

高坝泄洪诱发场地振动响应分析及传播规律

许志雯¹, 赵兰浩¹, 杜帅群², 朱晗玥¹, 张陆陈³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550002;
3. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:为研究高坝泄洪诱发场地振动的问题,提出一种基于黏弹性人工边界的有限元数值模拟和水力学模型试验相结合的方法计算场地振动响应。以国内某工程为例,计算不同工况下场地振动响应,分析泄洪量和泄洪调度方式对场地振动的影响,揭示不同岩体条件下振动波的传播规律。结果表明:该工程各种泄洪方式都不会对周边居民的生活造成影响;泄洪量越大,下游场地振动响应越大,当3个溢洪洞泄洪条件一致时,采用2号洞泄洪最不利;同等泄洪条件下,采用4洞均分泄洪的振动响应小于按设计开度泄洪的振动响应;模型范围内放大振动波的主因是断层左右岩体性质的差异,断层的存在进一步加大了放大效应。

关键词:场地振动;黏弹性人工边界;泄洪调度方式;振动波传播规律;有限元模拟;模型试验

中图分类号:TV698.1⁺62 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0036-06

Response analysis and propagation law of site vibration induced by high dam flood discharge//XU Zhiwen¹, ZHAO Lanhao¹, DU Shuaiqun², ZHU Hanyue¹, ZHANG Luchen³(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Power China, Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550002, China; 3. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the problem of site vibration induced by flood discharge of high dams, a method combining finite element numerical simulation and hydraulic model test is proposed to calculate the site vibration response. Taking a domestic project as an example, the vibration response of the concerned area under different working conditions was calculated. The influence of flood discharge and flood discharge scheduling mode on the site vibration was analyzed, and the propagation law of vibration wave under different rock conditions was revealed. The results show that the life of the surrounding residents cannot be affected by any kinds of flood discharge methods of the project. The larger the discharge, the greater the vibration response of the downstream site can be. When the flood discharge conditions of the three spillway tunnels are the same, the No. 2 tunnel discharge is the most unfavorable. Under the same flood discharge conditions, the vibration response of the four tunnels is less than that of the designed opening. The main reason for amplifying the vibration wave in the model range is the difference nature of the rock mass around the fault, the existence of faults further increases the amplification effect.

Key words: site vibration; viscoelastic artificial boundary; flood discharge scheduling mode; vibration wave propagation law; finite element simulation; model test

随着我国水电事业的蓬勃发展,大坝建设向高水头大泄量方向发展,高坝泄洪问题日益突出。高速下泄水流携带巨大能量,会诱发水工建筑物本身以及基础和周边场地的振动。关于泄洪振动的研究,过去主要关注泄洪诱发的包括挡水建筑物^[1-3]、泄水建筑物^[4-7]、消能建筑物^[8]、厂房^[9]等在内的水工建筑物自身的振动。随着大坝建设对环境的影响要求越来越严格,泄洪振动的研究对象也从水工建筑物自身扩展到周边场地。当居民区离泄洪区域距离过近或周围场地地质条件非均一时,可能会出现

振动响应过大的问题,国内外已出现不少由于高坝泄洪引发场地明显振动的工程实例^[10-12]。高坝泄洪虽不会直接危及居民的生命财产安全,但泄洪是个长期任务,当泄洪引起的环境振动长期超过限值,可能引起附近建筑物开裂,居民恐慌不安等,对周边居民的生活造成负面影响。因此准确模拟高坝泄洪诱发的场地振动响应,具有重要的意义。

关于大坝泄洪引起环境振动的研究起步较晚,研究方法和工程实例较少,目前主要有原型观测,数值模拟和模型试验3种方法。原型观测可准确获取

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407102);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y119004);华能科技项目(HNKJ15-H12)
作者简介:许志雯(1995—),女,硕士研究生,主要从事水工结构抗震研究。E-mail:1491712234@qq.com

场地振动响应,张超然等^[12-14]采用原型观测的方法研究了向家坝水电站下游水富县城的振动情况。模型试验在可研和设计阶段能提供参考,应用较多的水弹性模型试验可以较好地模拟泄洪诱发振动的水动力特性,李淑君等^[14-15]用水弹性模型试验研究了引发场地振动的主要振源,但模型试验范围有限,大范围复杂地形场地振动模拟实施困难,且实际操作并不能做到完全水弹性。原型观测和模型试验的通病是无法模拟振动波的传播过程,难以明确振动波的传播机理。数值模拟能较好地模拟振动波的传播规律及路径,但在高坝泄洪诱发场地振动的研究中应用较少,主要原因有两方面,一方面是泄洪诱发建筑物、地基及场地的振动是个复杂的流固耦合问题,直接模拟难度大,另一方面如果边界条件设置不合理会造成振动波的振荡,无法模拟模型以外的无限地基对近场振动的影响,不能保证模拟的精度。近年来一些学者的研究取得了突破性进展,如李淑君等^[14]将水力学模型试验量测的脉动压力作为荷载施加到数值模型上,张龔等^[16]将原型测量的脉动压力作为荷载施加到数值模型上,他们都将复杂的流固耦合问题转化为简单的“输入-结构-输出”问题;张龔等^[16]引入“无限元-有限元”耦合的方法来处理数值模型边界问题。为了保证模拟精度和易于编程,本文提出一种基于黏弹性人工边界的高坝泄洪诱发场地振动的数值模拟方法。考虑到场地范围大,相应的有限元模型网格数量多,动力计算效率低下,采用多重网格加速和大规模分区并行计算的方式来提高模拟的精度和效率。运用自主编写的程序,计算不同工况下场地振动响应,分析泄流量和泄洪调度方式的影响,揭示特殊岩体条件下振动波的传播规律。

1 基本原理

1.1 动力时程法

动力时程分析方法是用于计算承受随时间变化载荷的结构的动力学响应的一种方法。时程分析法是由初始状态开始,一步一步地根据该步末新步始的连续条件算下去,从而求出每一步时刻末了的振动状态,直至最终状态。

对多自由度体系,采用有限元方法离散可得到动力平衡方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R_0 \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为体系的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \ddot{u} 、 \dot{u} 、 u 分别为体系的加速度、速度、位移反应列阵; R_0 为水流脉动压力荷载。

1.2 黏弹性人工边界

泄洪诱发场地振动本质上是一个波源问题,为

了保证振动波在人为截取的模型范围中传播不失真,引入黏弹性人工边界来准确模拟外部无限域对近场振动的影响,使振动波到达边界时能完全透射过去。黏弹性人工边界最早由 Deeks 等^[17]提出,通过在人工边界上设置阻尼器和弹簧,既考虑了对散射波的吸收,又能模拟半无限地基的弹性恢复能力,克服了固定边界无质量地基辐射阻尼效应的影响^[18]。

在距波源任意半径 r_b 处以矢径 r_b 为外法线的微元面上应力与该处速度和位移的关系为

$$\tau(r_b, t) = -\frac{G}{2r_b}w(r_b, t) - \rho c_s \frac{\partial w(r_b, t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: τ 为边界上的应力; w 为介质的平面位移; c_s 为剪切波速, $c_s = \sqrt{G/\rho}$; G 为剪切模量; ρ 为质量密度; t 为时间。

物理元件—黏性阻尼器 C_b 和线性弹簧 K_b 分别为

$$C_b = \rho c_s \quad (3)$$

$$K_b = \frac{G}{2r_b} \quad (4)$$

式中: C_b 、 K_b 分别为人工边界节点上的阻尼系数和等效刚度系数。

如果能确定波源到人工边界的距离 r_b ,就可求出物理元件 C_b 和 K_b 的值,在边界上设置该物理元件,便能够同时模拟散射波辐射和地基弹性恢复能力。

2 高坝泄洪诱发场地振动响应分析

本文通过水力学模型试验测出水垫塘底部和边墙的脉动压力,再将所测的脉动压力施加到模型上计算其响应,是经典的“输入-结构-输出”振动系统。场地的振动响应受到多种因素的影响,从输入来看,泄流量和泄洪调度方式决定了水垫塘结构的脉动压力分布;从结构来看,模型范围内的岩体性质对振动波的传播有巨大影响;从输出来看,场地振动响应与该处场地的地基结构形式和其他建筑物相关。

2.1 工程简介

该工程为心墙堆石坝,最大坝高 315.0 m,工程规模为一等大(1)型。枢纽建筑物由砾石土心墙坝、3条洞式溢洪洞、泄洪洞、放空洞、右岸引水发电系统组成。水垫塘位于坝址下游 480 m 处主河道内,最大长度约 490 m,平均宽度为 175 m,底板高程为 2 590.00 m。重点关心区域内基岩岩性以区域性断裂分界,断裂西侧大坝及水垫塘所在岩层为中三叠统竹卡组(T_2z),断裂东侧居民及学校区域所在岩层为侏罗系中统花开组(J_2h)。本文计算了表 1 中 20 个实际工况,其中工况 1~4 分别为泄洪系统在洪水频率 P 为 1%、5%、20%、0.2% 时的运行工况。

表 1 计算工况

工况	水位/m		相对开度				泄量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
	上游水位	下游水位	1号洞式溢洪洞	2号洞式溢洪洞	3号洞式溢洪洞	泄洪洞	
1	2895.0	2631.1	1/8	1	1	0	6931
2	2895.0	2628.0	0	1/2	1	0	5230
3	2895.0	2624.9	0	1/8	1	0	3746
4	2864.9	2619.9	0	0	0	1	1746
5	2895.0	2620.6	1/2	0	0	0	2023
6	2895.0	2617.6	1/4	0	0	0	1038
7	2895.0	2615.6	1/8	0	0	0	540
8	2895.0	2620.6	0	1/2	0	0	2023
9	2895.0	2617.6	0	1/4	0	0	1038
10	2895.0	2615.6	0	1/8	0	0	540
11	2895.0	2620.6	0	0	1/2	0	2023
12	2895.0	2617.6	0	0	1/4	0	1038
13	2895.0	2615.6	0	0	1/8	0	540
14	2895.0	2631.1	<1/2	<1/2	<1/2	4/5	6931
15	2895.0	2628.0	<3/8	<3/8	<3/8	>1/2	5230
16	2895.0	2624.9	1/4	1/4	1/4	>1/4	3746
17	2895.0	2623.0	1	0	0	0	
18	2895.0	2623.0	0	1	0	0	
19	2895.0	2623.0	0	0	1	0	
20	2895.0	2623.0	0	0	0	1	

注:工况 14~16 中 4 孔泄量均分。

2.2 有限元模型

网格整体模型见图 1, 共有 139.5 万个节点, 134.7 万个单元, 采用八节点六面体单元进行空间离散, 网格尺寸约 20~40 m, 由于大规模建模时精度不够, 不考虑覆盖层的影响, 模拟大致山体地形, 将竹卡断裂沿走向简化为 3 段, 保留其倾角和厚度。地基材料参数如表 2 所示。

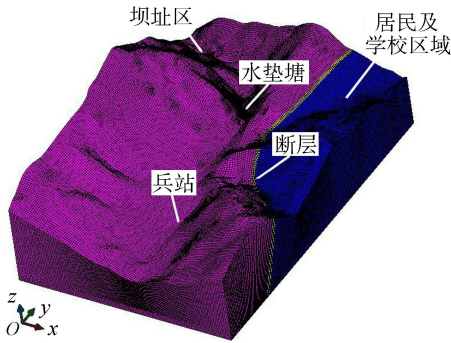


图 1 网格模型

表 2 材料参数

基岩	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	变形模量/ GPa	泊松比	剪切波速/ ($m \cdot s^{-1}$)
T_2z	2.65	3.0	0.32	650
J_2h	2.60	0.8	0.35	310
断层	2.40	0.5	0.35	260

2.3 荷载输入方式

通过水力学模型试验, 测量 20 个工况下的水垫塘底板和边墙的脉动压力, 作为场地振动的激励输入, 试验模型如图 2 所示。在水垫塘底板布置 17 个测点, 左右岸边墙各 4 个测点, 共 25 个测点(图 3)。

由于工程应用中脉动压力点面转换关系复杂, 此处为保守起见, 将测点所测脉动压力转化为原型的脉动压力后, 以点荷载数值作为面压荷载施加到模型相应位置。脉动压力测量总时长为 10 s。



图 2 试验模型

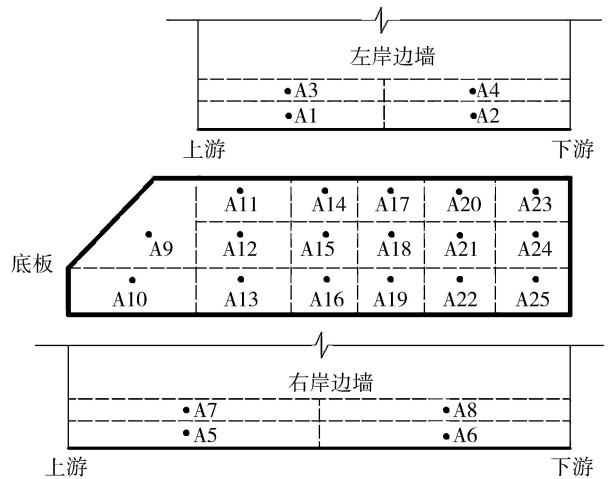


图 3 测点布置

2.4 动力响应影响

本文采用自制程序,利用数值计算模型进行该工程频率洪水工况下泄洪振动效应仿真,得出不同泄洪工况下居民及学校区域和兵站两个区域的振动响应,统计均方根值以反映振动响应的有效值,揭示场地振动与泄量、工况、调度方式的相关性,评价工程泄洪时是否会对周边居民造成影响。

采用 GB 10070—88《城市区域环境振动标准》评价泄洪振动对人体舒适度的影响。该标准规定,居民及学校区域的铅垂向振级标准值白天不超过 70 dB,夜间不超过 65 dB^[19]。由有限元计算结果统计得 20 个工况下居民及学校区域和兵站区域的垂向加速度均方根值(表 3)。居民及学校区域垂向加速度均方根最大值为 0.076 gal,用振级表示为 58 dB;兵站区域垂向加速度均方根最大值为 0.062 gal,振级表示为 56 dB。环境振动响应符合规范要求,表明该工程泄洪时不会对周边居民造成明显影响。

表 3 垂向加速度均方根值 gal

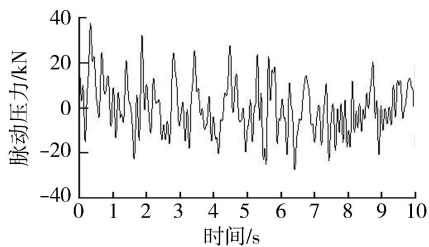
工况	均方根		工况	均方根	
	居民及学校区域	兵站区域		居民及学校区域	兵站区域
1	0.076	0.062	11	0.053	0.058
2	0.053	0.056	12	0.027	0.014
3	0.044	0.043	13	0.008	0.009
4	0.062	0.051	14	0.07	0.045
5	0.045	0.031	15	0.045	0.030
6	0.023	0.014	16	0.034	0.019
7	0.017	0.008	17	0.038	0.038
8	0.060	0.065	18	0.041	0.034
9	0.023	0.024	19	0.042	0.027
10	0.010	0.007	20	0.068	0.037

2.5 频谱分析

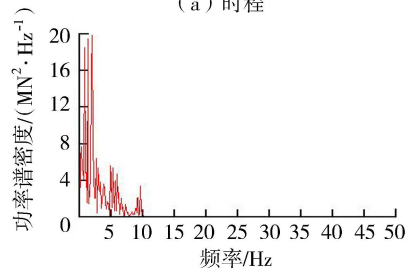
对工况 1 各测点脉动压力进行频谱分析可知,脉动压力的频率都在 0~10 Hz 之间(图 4),大部分测点脉动压力的主频在 0~2 Hz 之间。对加速度响应进行频谱分析可知,兵站区域与水垫塘典型测点 A20 的振动频率在 2.5~10 Hz 之间,并且 15 Hz 频率左右有明显振动峰值(图 5 和图 6),这是由兵站和水垫塘所处的同一场地地质条件决定;居民及学校区域的加速度振动峰值在 0~5 Hz 之间(图 7)。居民及学校区域所处场地相较于兵站和水垫塘所处场地刚度更小,自振频率更低,所以振动响应主频更低。

2.6 泄洪调度方式影响分析

下泄水流携带巨大能量,需要在消能建筑物内耗散掉大部分能量后再排向下游河床,以免对下游河床造成冲刷。挑流消能主要依靠水垫塘内的淹没扩散和紊动剪切来消能。由于下游水位、泄洪量、开洞位置的不同,射流引起水垫塘内部脉动压力的分布差异较大,从而诱发场地振动的响应也不相同。

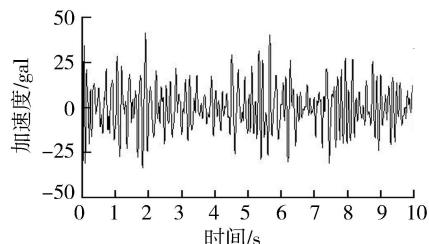


(a) 时程

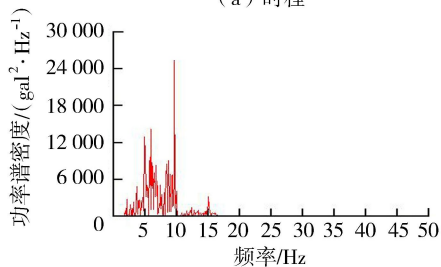


(b) 频谱

图 4 测点 A20 脉动压力时程与频谱

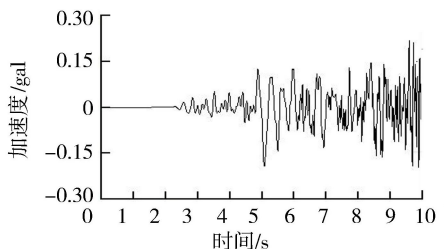


(a) 时程

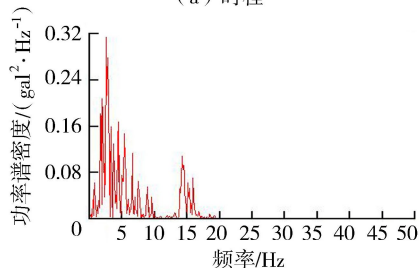


(b) 频谱

图 5 测点 A20 加速度响应时程与频谱



(a) 时程



(b) 频谱

图 6 兵站区域加速度响应时程与频谱

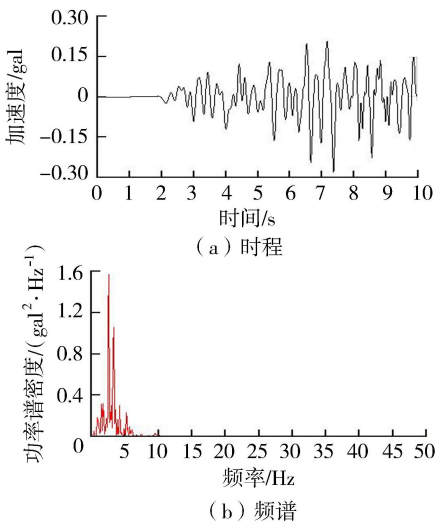


图7 居民及学校区域加速度响应时程与频谱

图8为3条洞式溢洪洞单洞运行时的结果,图9为

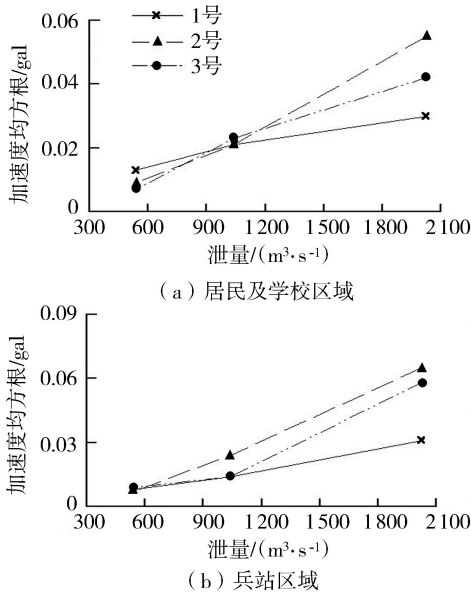


图8 溢洪洞单洞泄洪振动响应对比

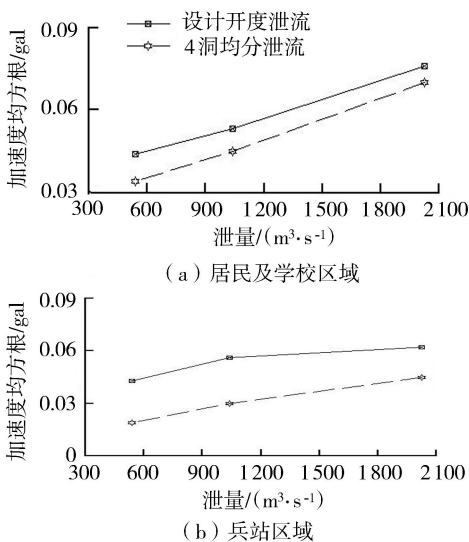


图9 4洞均分泄洪方式与设计开度泄洪方式振动响应对比

4洞均分泄洪时的结果。由图8和图9可知,场地振动响应与泄洪量成正比。1号,2号,3号溢洪洞单洞运行时,若泄洪量较大,同一泄洪量下单独开启2号洞激起的响应最大,3号洞次之,1号洞最小。对比洪水频率 P 分别为1%、5%、20%时泄洪系统按设计开度泄洪(工况1~3)和4洞均分泄洪的振动响应(工况14~16),结果表明当泄洪条件一致时,采用4洞均分泄洪方式激起的响应小于按设计开度泄洪的响应。

3 振动波传播规律

振动波以水垫塘为球心在岩体中呈球形扩散,传播至断层处,由于岩体性质的差异,振动波传播速度不同,开始呈现不规则球形扩散。振动波传播至模型边界处,被黏弹性边界很好地吸收,没有发生振荡。在振动波的传播路径上,如果岩体性质发生改变,振动波会在岩层分界面处发生反射与透射,反射与透射的波幅系数取决于岩体介质的波阻抗之比。重点关心区域内,岩体性质复杂,振动波由“硬”的 T_2z 岩体向“软”的 J_2h 岩体传播,中间还有一条更“软”的断层。激励波形复杂不规律,并且会在断层左右两个分界面处发生多次反射和透射。

为了研究岩体性质对振动波传播的影响,分别计算了5种情况:情况1,实际情况;情况2,断层材料改为 T_2z ;情况3,断层材料改为 J_2h ;情况4,模型全为 T_2z 材料;情况5,断层不变,左右土层为 T_2z 材料。在断层以左和断层以右区域各取一个点观察其前6s的振动,垂向位移响应时程曲线如图10所示。再统计两点在5种情况下的垂向位移响应均方根

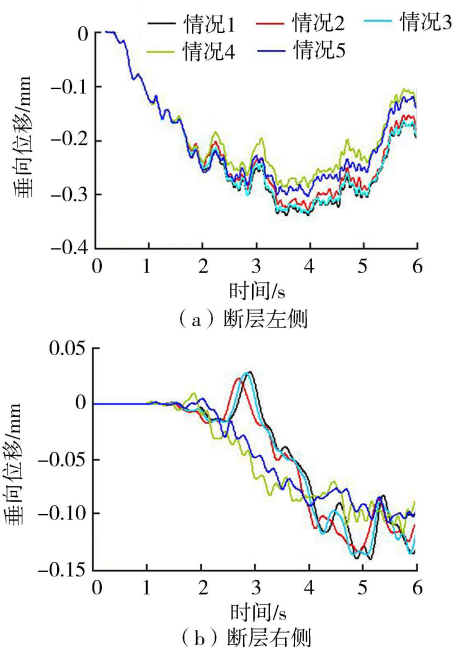


图10 5种情况垂向位移响应

值,可得到以下规律:当均一岩体中有一条断层时,断层的存在会起到一定的“隔振”作用,对断层之前区域的振动有轻微放大作用,放大效应约7%,而对断层之后区域的振动响应减弱约7%;当左右岩体性质出现差异时,场地的整体振动响应明显放大,相比于岩体均一情况整体放大约16%;当左右岩层不一致,中间还夹有一条断层即该工程实际情况,振动放大现象最明显,放大约18%。

断层以左区域的激励是直接施加的振动波和反射回的振动波的叠加,断层以右区域的激励是透射波。所以场地内各区域的振动响应不仅取决于反射波和透射波的波幅系数,还与岩层分界面的位置以及断层内多次反射、透射造成的相位差有关。

4 结 论

a. 不同工况下泄洪时,周边的居民及学校区域和兵站区域垂向加速度均方根最大值分别为58 dB, 56 dB,小于GB 10070—88《城市区域环境振动标准》规定的65 dB,表明泄洪不会对周边居民的生活造成影响。

b. 场地振动响应与泄量、工况、调度方式有较大关系。泄流量越大,场地振动响应越大。当1号、2号、3号溢洪洞单洞运行时,同一泄流量下2号洞泄洪对场地振动最为不利。当泄流条件相似时,泄洪洞激起的响应远大于3条洞式溢洪洞。当泄流条件一致时,4洞均分泄洪激起的振动响应小于设计开度泄洪的振动响应。

c. 岩体性质差异对场地振动有较大影响,模型范围内放大振动波的主因是断层左右岩体性质的差异,断层的存在进一步加大了放大效应。

参考文献:

[1] 崔广涛,彭新民,苑希民,等.高拱坝泄洪振动水弹性模型[J].水利学报,1996,27(4):1-9. (CUI Guangtao, PENG Xinmin, YUAN Ximin, et al. Hydroelastic model study on high arch dam vibration induced by discharge flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(4): 1-9. (in Chinese))

[2] 李火坤,邓冰梅,魏博文,等.基于有限测点的高拱坝原型整体动位移场反演研究[J].振动与冲击,2016,35(10):1-8. (LI Huokun, DENG Bingmei, WEI Bowen, et al. Inversion of the whole dynamic displacement field of a prototype high arch dam based on limited points measurement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 1-8. (in Chinese))

[3] 练继建,张建伟,李火坤,等.泄洪激励下高拱坝模态参数识别研究[J].振动与冲击,2007,26(12):101-105. (LIAN Jijian, ZHANG Jianwei, LI Huokun, et al. Study on modal parameter identification of high arch dam under

flood discharge excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(12): 101-105. (in Chinese))

[4] 陈林,杨敏,李火坤,等.泄洪闸闸墩抗振加固措施研究[J].水利水电技术,2016,47(9):28-33. (CHEN Lin, YANG Min, LI Huokun, et al. Study on seismic strengthening measures for pier of flood discharge gate [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(9): 28-33. (in Chinese))

[5] 吴杰芳,张林让,陈敏中,等.三峡大坝导流底孔闸门流激振动水弹性模型试验研究[J].长江科学院学报,2001,18(5):76-80. (WU Jiefang, ZHANG Linrang, CHEN Minzhong, et al. Study on vibration of bottom outlet gate for Three Gorges Project by hydroelastic model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5): 76-80. (in Chinese))

[6] 李火坤,杜磊,梁萱,等.基于原型振动测试的泄洪闸闸墩动位移反演[J].振动·测试与诊断,2018,38(6):1122-1129. (LI Huokun, DU Lei, LIANG Xuan, et al. Dynamic displacement inversion for sluice pier based on prototype vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1122-1129. (in Chinese))

[7] 李火坤,王刚.泄流结构振动反演与安全控制指标研究进展[J].水利水电科技进展,2020,40(2):81-89. (LI Huokun, WANG Gang. Research progress on vibration inversion and safety control index of flood discharge structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 81-89. (in Chinese))

[8] 冷东升,杨敏,马斌,等.基于锦屏一级原型观测水垫塘底板振动特性研究[J].南水北调与水利科技,2016,14(6):105-110. (LENG Dongsheng, YANG Min, MA Bin, et al. The vibration characteristics of slabs in plunge pool based on archetypal observation of Jinping-I Dam [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 105-110. (in Chinese))

[9] 彭新民,崔广涛.漫湾水电站厂房泄洪振动的模拟研究[J].水利水电技术,2001,32(7):44-47. (PENG Xinmin, CUI Guangtao. Simulation study on flood discharge vibration of Manwan Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(7): 44-47. (in Chinese))

[10] SHUMAKOVA E M, KOTLYAKOV A V, SHUMAKOV G V. The effect of vibrations in the Zhigulevskii Hydropower Structure on soils in the nearby territories of Tolyatti City [J]. Water Resources, 2010, 37(3): 306-310.

[11] 张陆陈,范雪梅,骆少泽,等.高坝泄洪消能诱发场地振动的预测方法[J].水利水电科技进展,2018,38(6):66-69. (ZHANG Luchen, FAN Xuemei, LUO Shaoze, et al. Prediction method of ground vibration induced by flood discharge and energy dissipation of high dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 66-69. (in Chinese))

(下转第74页)